

埋め込み可能な EFPI センサによる CFRP の長期微小熱ひずみ測定方法の開発

Development of a long-term micro-thermal strain measurement method for CFRP using embeddable EFPI sensors

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 兼久 泰希

1 緒言

CFRP は積層方法を工夫することにより、熱膨張を極めて小さくすることができる。この特性を生かし、人工衛星のアンテナや半導体製造装置のテーブルアームなどの寸法変化を嫌う部品に利用されている。しかし長期運用中に微小な変形が生じた場合は位置調整が必要である。そこで微小寸法変化のモニタリング機能を装置に付加することで、再調整が容易になると考えた。

EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) センサはひずみ解像度を容易に向上させることができ、また埋め込み時の残留応力の影響を受けないなどのメリットが多くある。我々はこれまで、微小ひずみ測定が可能な EFPI センサの開発と、それを埋め込んだ CFRP パッチ型センサの開発を試みてきた。しかし、干渉スペクトルから FFT によってひずみを得る方法では、十分なひずみ精度を得ることができなかつた。そこで本研究では、相互相関法を用いて解析手法を改良し、ひずみ測定精度の向上を試みた。さらに開発した手法を用いて、センサの付け外しを伴う場合における長期ひずみ測定精度の検証を行った。

2 センサ及び実験方法

2.1 EFPI センサと FFT による解析法

EFPI センサは図 1 に示すようなキャピラリの内部に入射用と反射用の 2 本の光ファイバを、ギャップ長 d で突き合わせた構造を持つ。入射用ファイバから入射したレーザー光が反射用ファイバ端面で反射し、干渉し合う。本研究では広帯域光源 (SLD, 中心波長 1550 nm) を用いて、干渉光を光スペクトラムアナライザで測定した。

計測された干渉スペクトルを P は、以下の式で表される。

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \frac{1}{2} \left(1 + e^{-\eta d} \cos \left(\frac{4\pi d}{\lambda} + \phi \right) \right) \quad (1)$$

ここでは P_0 光源スペクトル、 η は空気中減衰率、 ϕ は反射による位相回転である。式 (1) より、 $k = 2/\lambda$ の波数空間でフーリエ変換すると、ギャップ長の位置に明確なピークを持つ空間スペクトルが得られる。本研究では波長空間で得られたデータを再サンプリングによって波数空間に変換し、10 万点のゼロ点を追加したデータに対して FFT によるパワースペクトルを求め、ピーク位置としてギャップ長を得る。

2.2 相互相関法によるひずみ補正

FFT で得られるギャップ長は誤差が大きく、ひずみ精度が十分ではない。そこで本研究では相互相関法によるひずみ補正を試みた。測定されたスペクトルから余弦成分 S のみを取り出し、理論式(1)の余弦成分

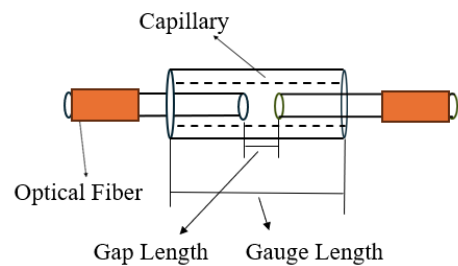


Fig.1 Structure of an EFPI Sensor

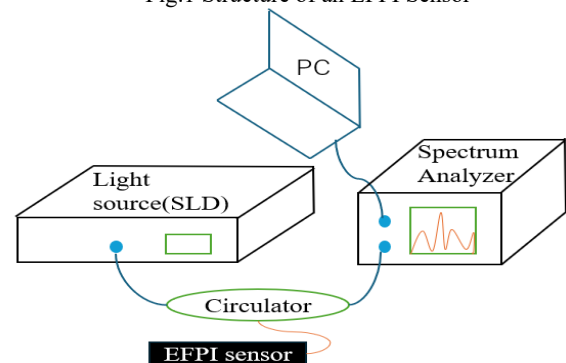


Fig.2 Strain measurement optics for an EFPI sensor

$$T(\lambda) = \cos \left(\frac{4\pi d}{\lambda} + \phi \right) \quad (2)$$

と掛け合わせて、以下の相互相関関数 C を得る。

$$C(d, \phi) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) T(\lambda, d, \phi) d\lambda \quad (3)$$

ここでは $[\lambda_1, \lambda_2]$ 解析波長範囲である。位相 ϕ は反射鏡面に起因するセンサ固有の値であり、センサの着脱や測定条件の変化で変わるものではない。そのため本研究では ϕ を固定値として扱った。 d を、FFT で得られたギャップ長を中心に变化させて相互相関関数を求めて、そのピーク値を補正されたギャップ長として、それを用いてひずみを計算する。

2.3 試験片

本研究で製作した光ファイバの直径は 0.125 mm 。キャピラリの内径は 0.140 mm 。外径は 0.20 mm であり、ギャップ長 d は約 $200 \mu\text{m}$ であった。CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を、一方向に 10 枚積層し、EFPI センサを埋め込んだ EFPI/CFRP パッチ型センサを用いた。

2.4 補正ひずみの評価試験

加熱試験によって、パッチ型センサのひずみ測定を行い、相互相関法による補正ひずみを評価した。また、室温にお

いて2秒間隔で100回測定を行い、位相 ϕ がギャップ長推定およびひずみ推定に与える影響を評価した。

2.5 付け外し長期測定試験

室温でコネクタを付け外ししながら2秒間隔で100回の測定を行った。これを1日に10回繰り返して、4日間測定した。

3 実験結果及び考察

3.1 位相回転量の測定への影響

室温での測定結果から、位相量0.0, 1.0, 2.0, 3.0で固定して算出したギャップ長とひずみの平均値を表1に示す。表から位相の違いは、ゲージ長では約0.13 μm と大きな違いを生じるが、ひずみにはほとんど差が見られないことが分かる。これより、位相値が固定されているならば、ひずみ測定への影響はないことが分かった。

Table 1 Effect of phase on measured values

Phase	0.0	1.0	2.0	3.0
Gap length [μm]	229.961	229.837	229.714	229.951
Strain [$\mu\epsilon$]	-0.0122	-0.0124	-0.0127	-0.0128

3.2 熱ひずみ評価試験

室温から90 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱を繰り返して得られた温度とひずみの関係をFFT、相互相関補正によって得られたひずみについて図3(a), (b)にそれぞれ示す。図より、FFTで算出したひずみには非線形的な変動が見られるが、相互相関法で補正したひずみは温度と線形的な関係を示し、また70 $^{\circ}\text{C}$ までは高い繰り返し性を示した。よって、相互相関法を用いることにより、正確に微小ひずみを、安定して測定できることが分かった。

3.3 センサ付け外しのひずみ測定への影響

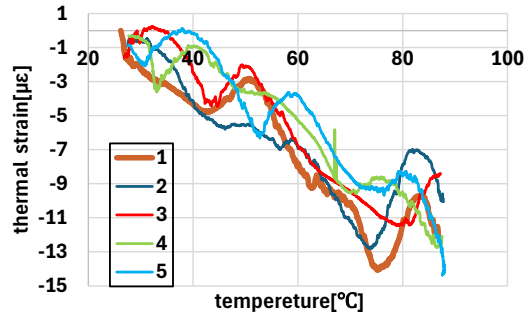
図4に、センサを計測システムからつけ外して、2秒間隔で100回ずつ連続測定を行い、10回の付け外しを行った。初回のひずみをゼロとして、ひずみを算出した結果を示す。図より付け外しによる測定値の差は $\pm 0.1 \mu\epsilon$ 以下であり、付け外しによるひずみの変動が非常に小さいことが分かった。よって、本センサでは測定中にセンサを取り外しすることが可能であることが分かった。

3.4 長期測定試験

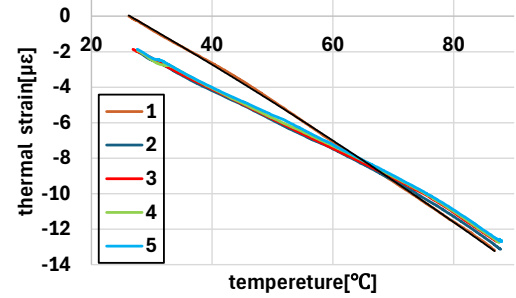
1日に1度、測定時にのみセンサを測定器に接続して、室温にてひずみ測定を行った結果を図5に示す。ここで図中のひずみは、初日の初回測定のひずみを0として計算した複数回計測のひずみの平均値である。図より、2日目の測定値の平均が約 $-0.45 \mu\epsilon$ であったが、他の日では $\pm 0.1 \mu\epsilon$ に収まっていることが分かった。CFRPパッチ型センサの温度依存性は $-0.18 \mu\epsilon / ^{\circ}\text{C}$ であったため、2日目の測定値は室温の違いの影響を受けたものと考えられる。センサを取り外した場合の測定においても4日間ではひずみはほとんど変化していないことが明らかであり、長期間の安定した微小ひずみ測定が可能であることが示唆された。

4 結言

本研究では、広帯域光源とEFPIセンサを用いたひずみ測定システムを改良し、FFTで得られたギャップ長に相互相関法による補正を行うことで、高精度の微小ひずみ測定が可能であることを示した。さらに本手法を用いれば、センサを付け外してもひずみ値がほぼ変わらないことが示された。よって、必要な時のみセンサを接続しても安定した微小ひずみ測定が可能であり、長期的な微小変形モニタリングが容易になると考えられる。



(a) Calculated by FFT



(b) Compensated by cross-correlation method

Fig.3 Relationship between temperature and thermal strain of specimen

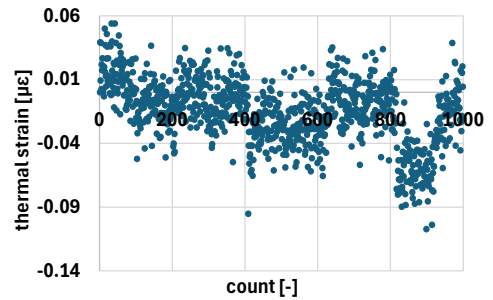


Fig.4 Strain measured under repeated sensor attachment and detachment conditions

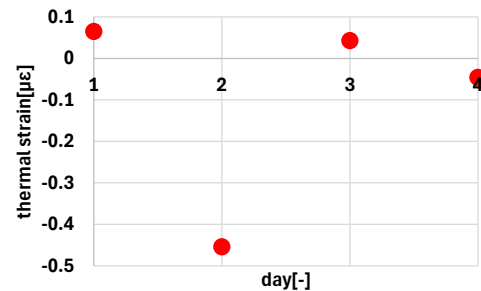


Fig.5 Long-term measurement with attachment and detachment for 4days average of 1day

参考文献

- (1) 高坂ほか, “埋め込み EFPI を用いたパッチ型微小ひずみセンサの開発”, 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集 2024.31 (0), D1-01-, 2024

謝辞

本研究を行うにあたり、株式会社アドテックエンジニアリングの皆様には資金や研究成果に関する議論など様々な面からサポートいただきました。深く感謝いたします。